

В. Л. КАЛЮЖНИЙ, К. Л. МАРЧУК

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН МЕТАЛУ ПРИ ХОЛОДНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ КОРОБЧАТИХ ВИРОБІВ З ПЛАСТИЧНОГО АЛЮМІНІЮ

Методом скінченних елементів створена математична модель та проведений аналіз холодного зворотного видавлювання коробчастого виробу з порожниною 12x12 мм із квадратної заготовки розмірами 20x20x20 мм із пластичного алюмінію Al-2024. Використана пластична зі зміцненням модель металу з врахуванням тертя по Кулону. Встановлені залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона, робота деформації, розподіли питомих зусиль на пуансоні, матриці і виштовхувачі. Виявлений тепловий ефект при холодному формоутворенні та визначена температура zdeформованого металу. Встановлений напружено-деформований стан, приведені розподіли компонент напружень і деформацій у zdeформованій заготовці. Показані кінцеві форма і розміри виробу. Проведено прогнозування механічних властивостей zdeформованого металу у стінках і донній частині виробу. На основі розрахункових даних розроблена конструкція штампу для видавлювання коробчастого виробу на гідравлічному пресі.

Ключові слова: холодне видавлювання, метод скінчених елементів, коробчастий виріб, зусилля видавлювання, напруження, деформації.

В. Л. КАЛЮЖНИЙ, К. Л. МАРЧУК

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ ХОЛОДНОМ ВИДАВЛИВАНИИ КОРОБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЯ

Методом конечных элементов создана математическая модель и проведен анализ холодного обратного выдавливания коробчатого изделия с полостью 12x12 мм с квадратной заготовки размерами 20x20x20 мм из пластичного алюминия Al-2024. Использована пластическая с упрочнением модель металла с учетом трения по Кулону. Установлены зависимость усилия выдавливания от перемещения пуансона, работа деформации, распределения удельных усилий на пуансоне, матрицы и выталкиватели. Обнаружен тепловой эффект при холодном формообразовании и определена температура деформированного металла. Установлено напряженно-деформированное состояние, приведены распределения компонент напряжений и деформаций в деформированной заготовке. Показаны конечные форма и размеры изделия. Проведено прогнозирование механических свойств деформированного металла в стенках и донной части изделия. На основе расчетных данных разработана конструкция штампа для выдавливания коробчатого изделия на гидравлическом прессе.

Ключевые слова: холодное выдавливание, метод конечных элементов, коробчатое изделие, усилие выдавливания, напряжения, деформации.

V. L. KALIUZHNYI, K. L. MARCHUK

STRESS-DEFORMED STATE OF METAL IN COLD WOODWORKING OF CORBORATED ARTICLES OF PLASTIC ALUMINUM

A mathematical model was created by the finite element method and the analysis of cold back extrusion of a boxed product with a cavity of 12x12 mm from a square billet of dimensions 20x20x20 mm made of ductile aluminum Al-2024 was carried out. A plastic model with reinforcement was used taking into account the Coulomb friction. The dependence of the extrusion force on the movement of the punch, the work of deformation, the distribution of specific forces on the punch, the matrix and the ejectors are established. A thermal effect was detected during cold forming and a certain temperature of the deformed metal. The stress-strain state is established, the distribution of stress and strain components in the deformed workpiece is given. The final shape and dimensions of the product are shown. The prediction of the mechanical properties of the deformed metal in the walls and bottom of the product is carried out. Based on the calculated data, a die design was developed for extruding a box-like product on a hydraulic press.

Key words: cold extrusion, finite element method, box product, extrusion force, stress, deformation.

Вступ. Квадратні і прямокутні коробки достатньо розповсюджені деталі, які виготовляють холодним зворотним видавлюванням із пластичних сталей і кольорових металів. При проектуванні технології видавлювання коробок мають місце обмеження на мінімальну товщину стінки і дна, а також на максимальну глибину вдавливания пуансона в заготовку [1, 2]. Як показали експериментальні дослідження і виробничий досвід при холодному видавлюванні коробчастих виробів має місце суттєва нерівномірність деформацій, яка приводить до утворення виступів на торцях стінок. Тому потрібна додаткова операція підрізання торців стінок. В літературних джерелах по проектуванню технології видавлювання коробок мають місце дані по визначенню зусилля видавлювання [3, 4]. Практично відсутні відомості по встановленню кінцевих форм і розмірів коробчастих виробів, зміцнення zdeформованого металу. Для розроблення технології холодного видавлювання коробчастих виробів потрібне доопрацювання технологічних і

конструктивних параметрів трудомісткими з великою вартістю експериментальними роботами. Використання математичних моделей на основі методу скінченних елементів (МСЕ) вказаних процесів дозволяє визначити силові режими видавлювання, розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті і встановити кінцеву форму і розміри виробів [5]. Однак мало даних по напружено-деформованому стану металу і практично відсутні відомості по тепловому ефекту при холодному формоутворенні коробок.

Мета роботи. Метою даної роботи є створення скінченно-елементних моделей холодного видавлювання квадратних коробчастих виробів та проведення розрахункового аналізу із встановленням параметрів для проектування технології.

Виклад основного матеріалу. При розрахунковому аналізі враховані наступні конструктивні параметри – геометрична форма

пуансона, матриці, виштовхувача, а також ряд технологічних – форма заготовки, ступінь деформації, тертя на контактуючих поверхнях по Кулону із коефіцієнтом тертя $\mu=0,08$, швидкість деформування. Метал вважався пластичним зі зміцненням, а деформуючий інструмент – абсолютно жорстким.

Схема зворотного видавлювання коробчастих виробів і форма торця пуансона приведені на рис. 1. На рис. 1а зображена в двох проекціях схема видавлювання. Ліворуч від вісі симетрії показане положення перед видавлюванням, праворуч – в кінці

видавлювання. Квадратна заготовка 1 встановлена в матриці 2 на виштовхувачі 3. Зусилля видавлювання P прикладається за допомогою пуансона 5, який зміщується вниз зі швидкістю $V_0=2$ мм/сек. В кінці видавлювання отримується виріб 5. Форма робочого торця пуансона з позначеннями приведена на рис. 1б. Вихідна заготовка із алюмінію Al-2024 мала розміри $B \times C \times H=20 \times 20 \times 20$ мм. Розміри пуансона; $a \times b=12 \times 12$ мм; $R=l=2$ мм, $r=1$ мм; $z=0,15$ мм.

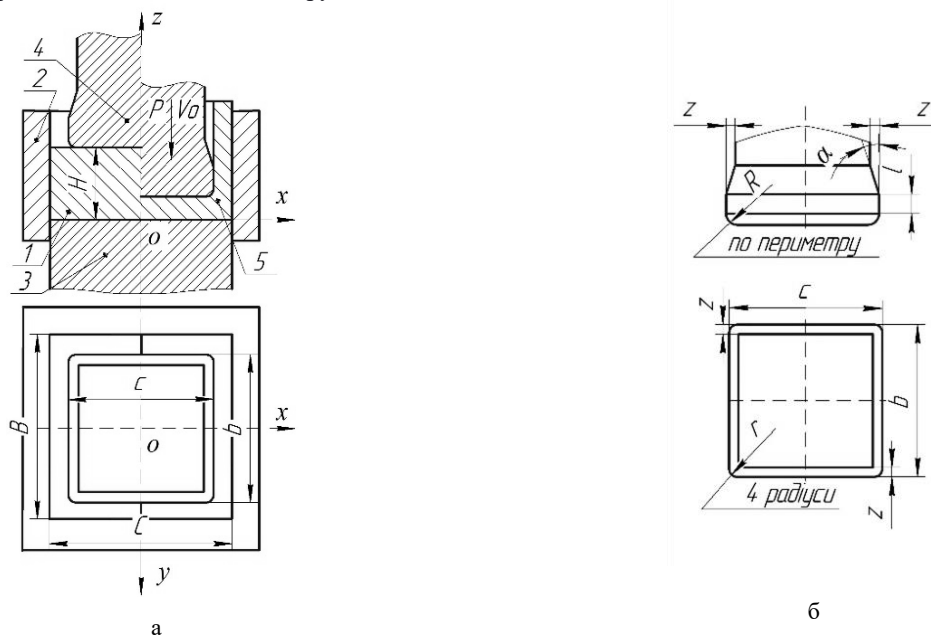


Рис. 1 – Схема видавлювання: а – проекції схеми видавлювання; б - форма робочого торця пуансона

Розрахункові схеми в розрізі, які створені в скінченно-елементному середовищі DEFORM, показані на рис. 2. На рис. 2а приведена схема на

початку видавлювання. Заготовка 1 розміщена в матриці 2 на виштовхувачі 3. При опусканні пуансона 4 утворюється виріб 5 (рис. 2б).



Рис. 2 – Розрахункові схеми: а - на початку видавлювання та б – в кінці видавлювання

Обговорення результатів. Силовий режим видавлювання та розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті показані на рис. 3. На рис. 3а приведена залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона. На початку видавлювання

зусилля інтенсивно зростає, а потім при переміщенні пуансона 7 мм і величині $P=168$ кН процес переходить в усталену стадію, на якій зусилля практично не змінюється. Розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті можна оцінити по

величинах нормальних напружень σ_n на контактуючих поверхнях між заготовкою і інструментом. На рис. 3а показаний розподіл таких напружень на поверхні пуансона в перерізі по площині xoz (див. рис. 1а). На вісі пуансона отримано $\sigma_n=1030$ МПа, на довжині 4 мм – $\sigma_n=1300$ МПа, а на торці – $\sigma_n=350$ МПа (див. рис. 1б). Розподіл нормальних напружень по висоті поверхні матриці зображений на рис. 3в. Найбільша величина $\sigma_n=690$ МПа виникає на матриці у місці

контакту донної частини заготовки з матрицею. При таких питомих зусиллях матриця повинна бути одноканалованою – складатися із внутрішньої втулки і бандажу. На рис. 3г наведений розподіл напружень σ_n на поверхні виштовхувача. В перетині вісей отримано $\sigma_n=790$ МПа з подальшим зменшенням до $\sigma_n=480$ МПа при наближенні до торця виштовхувача.

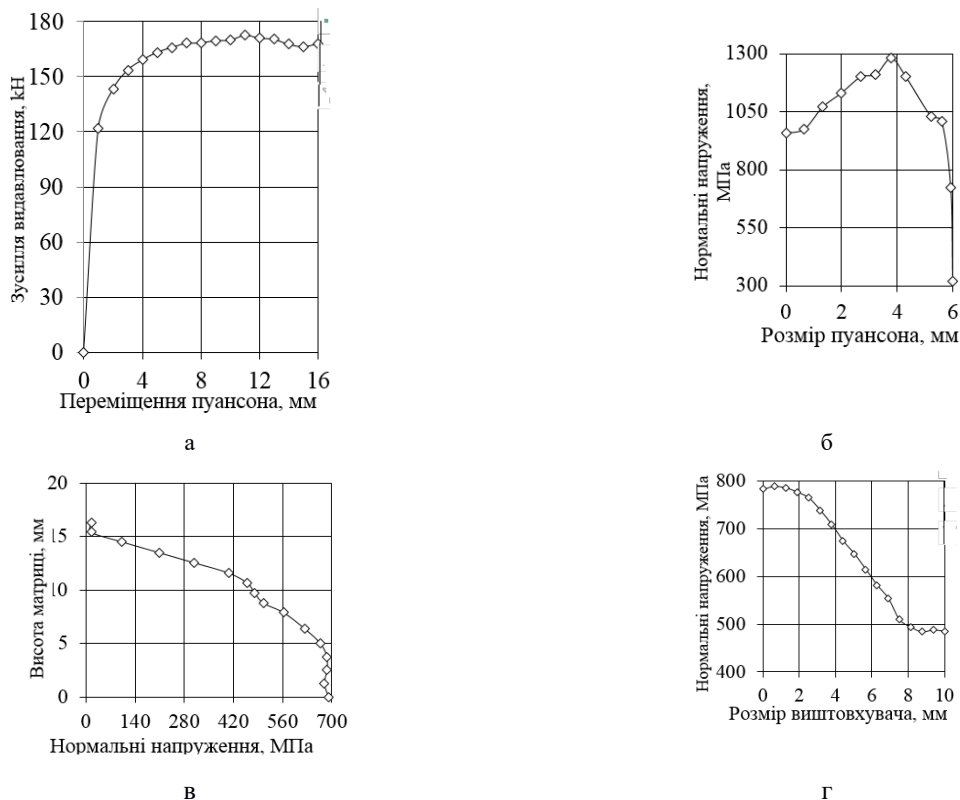


Рис. 3 – Силовий режим видавлювання та розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті
а – розподіл таких напружень на поверхні пуансона в перерізі по площині xoz ; б – розподіл нормальних напружень на вісі пуансона та на довжині; в – розподіл нормальних напружень по висоті поверхні матриці; г – розподіл напружень σ_n на поверхні виштовхувача

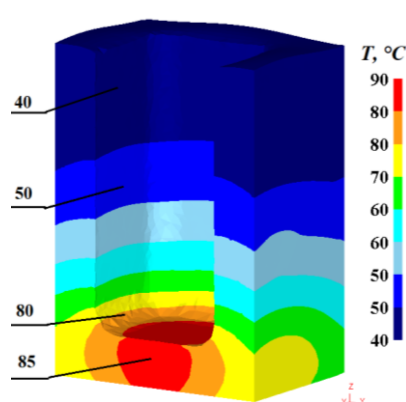


Рис. 4 – Температура здеформованої заготовки в кінці видавлювання

Моделювання з використанням МСЕ також процесі холодного деформування. Розподіл дозволяє визначити зміну температури заготовки в температурі у перерізі здеформованої заготовки

приведений на рис. 4. Найбільша температура у межах $T=80^{\circ}\div 90^{\circ}\text{C}$ виникає в осередку деформації, який розташований під пуансоном. В області торців стінок температура досягає $T=40^{\circ}\div 50^{\circ}\text{C}$ зі зростанням до величини $T=70^{\circ}\div 80^{\circ}\text{C}$ в місцях переходу стінок у донну частину здеформованої заготовки.

Розподіли компонент напружень приведені на рис. 5. На рис. 5а зображений розподіл напружень σ_z . У донній частині здеформованої заготовки виникають стискаючі напруження у межах $\sigma_z=-300\div -990$ МПа. В місцях переходу донної частини в стінки отримано $\sigma_z=-170\div -300$ МПа. В самих стінках такі напруження стають розтягувальними і досягають величини $\sigma_z=200$ МПа у внутрішніх шарах металу стінок. Розподіл напружень σ_x приведений на рис. 5б. У донній частині здеформованої заготовки величини таких напружень знаходяться у межах $\sigma_x=-380\div -900$ МПа. Практично у всьому об'ємі донної частини здеформованої заготовки виникають стискаючі напруження σ_y (рис. 5в). Розподіл інтенсивності

напружень σ_i показаний на рис. 5г. З нього видно, що осередок деформації під пуансоном розповсюджується на глибину 12 мм у здеформованій заготовці.

Розподіли компонент деформацій у здеформованій заготовці в кінці видавлювання показані на рис. 6. У донній частині виникають стискаючі деформації в напрямку вісі z , які знаходяться у межах $\varepsilon_z=-0,1\div -0,9$ (рис. 6а). У стінках ці деформації розтягувальні, причому у зовнішніх шарах металу стінок вони досягають $\varepsilon_z=0,2\div 0,6$, а в шарах металу стінок зі сторони порожнини отримано $\varepsilon_z=0,6\div 1,0$. Деформації ε_x розподілені нерівномірно. У стінках вони розтягувальні і знаходяться у межах $\varepsilon_x=0,0\div 0,4$, а в кутових зонах здеформованої заготовки ці деформації стають стискаючими та досягають значень $\varepsilon_x=-0,1\div -0,3$ (рис. 6б). Практично по всьому об'єму стінок виникають стискаючі деформації ε_y , а в донній частині вони стають розтягувальними (рис. 6в).

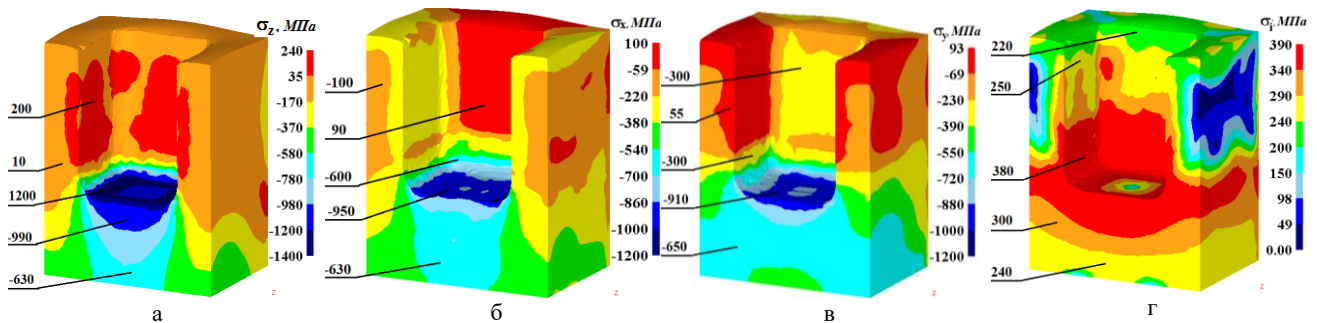


Рис. 5 – Розподіли компонент напружень у перерізі заготовки: а – розподіл напружень σ_z , б – розподіл напружень σ_x , в – розподіл напружень σ_y , г – розподіл інтенсивності напружень σ_i

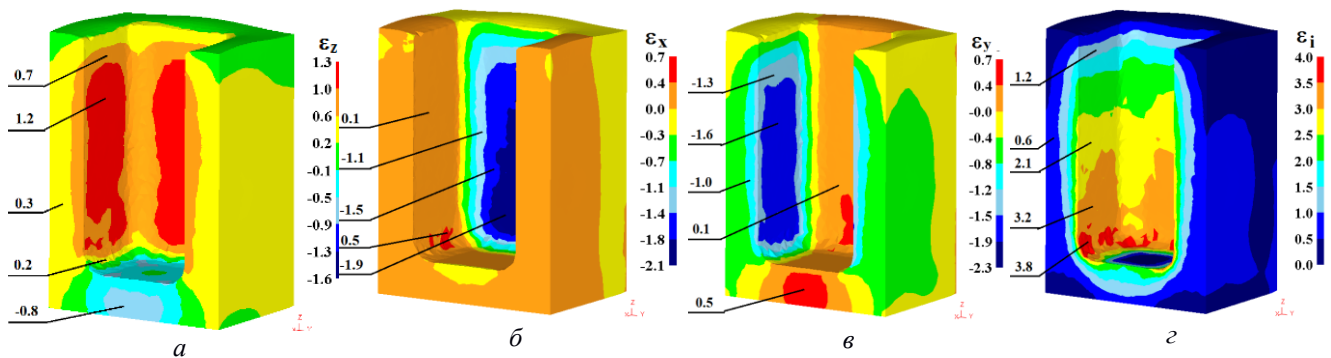


Рис. 6 – Розподіли компонент деформацій у перерізі здеформованої заготовки: а – розподіл деформацій ε_z , б – розподіл деформацій ε_x , в – розподіл деформацій ε_y , г – розподіл інтенсивності деформацій ε_i

По розподілу інтенсивності деформацій ε_i можна оцінити пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією та спрогнозувати межу текучості здеформованого металу. Розподіл ε_i показаний на рис. 6г. У донній частині під пуансоном має місце пропрацювання по всій висоті. В області під пуансоном отримано $\varepsilon_i=1,5\div 2,0$, а біля торця донної частини – $\varepsilon_i=0,5\div 1,0$. У кутових зонах донної частини здеформованої заготовки величини цих

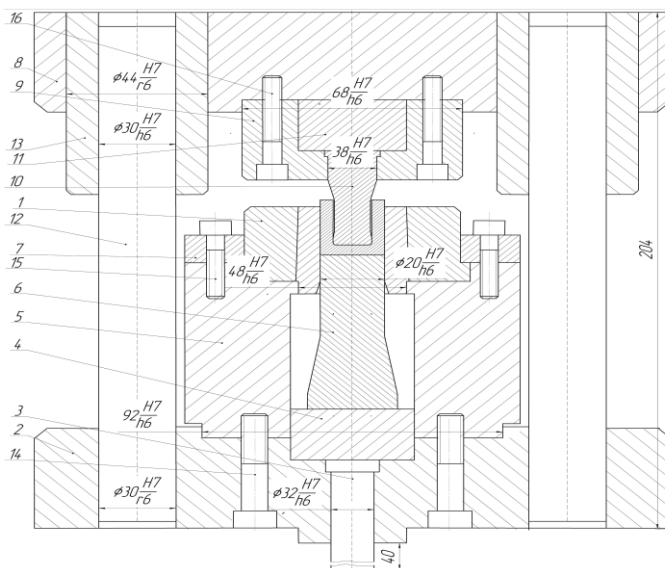
деформацій досягають значень $\varepsilon_i=0,0\div 0,5$. По ширині стінок має місце нерівномірний розподіл ε_i . В шарах металу стінок зі сторони порожнини отримано $\varepsilon_i=2,0\div 2,5$; по середині стінок – $\varepsilon_i=1,0\div 1,5$; біля зовнішніх поверхонь стінок – $\varepsilon_i=0,5\div 1,0$. З використанням експериментальної діаграми істинних напружень для алюмінію Al-2024 по визначених величинах ε_i можна спрогнозувати величину напруження текучості σ_s здеформованого

металу. Середнє значення інтенсивності деформацій у стінці складає $\varepsilon_i=0,8$. По діаграмі істинних напружень при такій величині ε_i маємо $\sigma_s=370$ МПа. У донній частині під пуансоном отримано $\varepsilon_i=1,2$. У цьому місці $\sigma_s=385$ МПа.

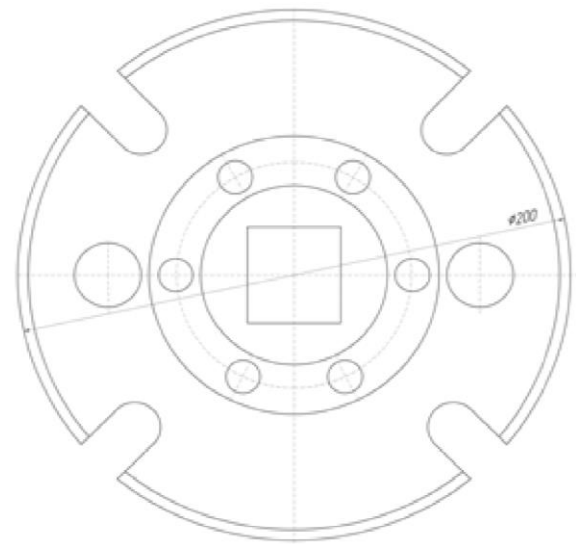
Таким чином, в результаті розрахункового аналізу отримані всі необхідні дані для проектування технології: зусилля видавлювання – для вибору пресового обладнання, розподіл питомих зусиль – для проектування штампового оснащення і прогнозування стійкості деформуючого інструменту, напружено-деформований стан – для прогнозування механічних властивостей здеформованого металу. За результатами розрахунків розроблена конструкція штампового оснащення для видавлювання коробчастого виробу, яка наведена на рис. 7. На рис. 7а показаний вигляд в розрізі, а на рис. 7б – вигляд на нижню плиту. Штамп містить нижню плиту 2 з колонками 12 і верхню плиту 8 з втулками 13. На плиті 2 встановлені штовхач

3, квадратна опорна плита 4 і кругла обойма 5, яка має квадратну опорну поверхню. Обойма 5 закріплена гвинтами 14. Зверху на обоймі 5 з центруванням внутрішньої втулки в квадратному отворі розміщена однобандажована матриця 1 із виштовхувачем 6 і зафіксована за допомогою кільця 7 і гвинтів 15. У верхній плиті 8 встановлений квадратний пуансонотримач 9 з пуансоном 10 і опорною плитою 11 та закріплений гвинтами 16. Штамп встановлюється на гідравлічний прес зусиллям 630 кН.

В вихідному стані перед видавлюванням відстань між нижнім торцем пуансона 10 і поверхнею матриці 1 дещо більша за висоту виробу. В матрицю 1 розміщується вихідна квадратна заготовка. При опусканні верхньої плити виконується видавлювання виробу. Видалення виробу із матриці 1 виконується виштовхувачем 6, який приводиться в рух від виштовхувача пресу через штовхач 3 і опорну плиту 4.



а



б

Рис. 7 – Конструкція штампа для видавлювання коробчастого виробу : а – вигляд в розрізі, б – вигляд на нижню плиту

Висновки. За допомогою метода скінченних елементів створена математична модель та проведений розрахунковий аналіз холодного зворотного видавлювання із пластичного алюмінію квадратного порожнистого виробу з постійною по периметру товщиною стінки. Встановлені зусилля видавлювання, розподіли питомих зусиль на пуансоні, матриці та виштовхувачі. Виявлений тепловий ефект при видавлюванні і температура здеформованого металу. Визначений напружено-деформований стан в процесі холодного формоутворення. На основі розрахункових даних спроектований штамп для видавлювання.

Список літератури

1. Гречников Ф.В. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / Ф.В. Гречников, А.М. Дмитриев, В.Д. Кухарь и др.; под общ. Ред. А.Г. Овчинникова // – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
2. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В.А. Евстратов // – Х.: Вища шк. изд-во при Харьк. ун-те, 1987. – 144 с.
3. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов (предс.) и др. т.3. Холодная объемная штамповка. Под ред. Г.А. Навроцкого // – М.: Машиностроение, 1987. – 384 с.
4. Семенов И.Е. Выдавливание коробчатых деталей с локальными активными силами трения / И.Е. Семенов, А.В. Иванов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – Орел, ОГУ, 2019. – № 4-2 (336). – С. 172–181.
5. Калужний В.Л. Аналіз холодного зворотного видавлювання квадратних і прямокутних коробок із сталі і алюмінію / В.Л. Калужний, М.С. Ніколенко, О.В. Мельник // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Машинобудування. – Київ: НТУУ «КПІ», 2011. – №63. – С. 112–117.

References (transliterated)

1. Grechnikov F.V. Progressivnye tehnologicheskie processy holodnoj shtampovki / F.V. Grechnikov, A.M. Dmitriev, V.D. Kuhar i dr.; pod obsh. Red. A.G. Ovchinnikova – Moscow: Mashinostroenie, 1985. – 184 p.
2. Evstratov V.A. Osnovy tehnologii vydavlivaniya i konstruirovaniya shtampov / V.A. Evstratov // – KHarkov: Visha shk. izd-vo pri KHark. un-te, 1987. – 144 p.
3. Kovka i shtampovka: Spravochnik. V 4-h t. / Red. sovet: E.I. Semenov (preds.) i dr. Vol. 3. Holodnaya obemnaya shtampovka. Pod red. G.A. Navrockogo – Moscow: Mashinostroenie, 1987. – 384 p.
4. Semenov I.E. Vydavlivanie korobchatyh detalej s lokalnymi aktivnymi silami treniya / I.E. Semenov, A.V. Ivanov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – Orel, OGU, 2019. – No 4-2 (336). – P. 172–181
5. Kalyuzhnyi V.L. Analiz holodnogo zvorotnogo vidavlyuvannya kvadratnih i pryamokutnih korobok iz stali i alyuminiyu / V.L. Kalyuzhnyi, M.S. Nikolenko, O.V. Melnik // Visnik NTUU «KPI». Seriya: Mashinobuduvannya. – Kiyiv: NTUU «KPI», 2011. – No 63. – P. 112–117.

Надійшла (received) 22.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Author

Калюжний Володимир Леонідович (Калюжный Владимир Леонидович, Kaljuzhnyi Vladimir) – доктор технічних наук, професор. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; e-mail: kwl_2011@ukr.net.

Марчук Констянтин Леонідович (Марчук Константин Леонидович, Marchuk Kostiantyn) – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», студент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів.